УДК 621.039.62

ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР ДЛЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛНИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТИ

А.Г. Горюнов, С.Н. Ливенцов

Томский политехнический университет
E-mail: alex79@phtd.tpu.edu.ru

Рассматриваются недостатки стандартного регулятора системы автоматического управления с исполнительным механизмом постоянной скорости и искажения, вносимые им при реализации типового закона регулирования, влияние нелинейностей на качество регулирования. Предлагается новая реализация цифрового регулятора, обеспечивающего аппроксимацию типового закона регулирования с высокой точностью в широком диапазоне изменения параметров.

В системах автоматического регулирования (САР) с исполнительными механизмами (ИМ) постоянной скорости, построенных на основе микропроцессорных систем, для реализации пропорционально-интегрально-дифференциального-закона (ПИД-закона) регулирования зачастую используется пропорциональное-дифференциальное-дважды дифференциальное-звено (ПДД^2-звено) и программный или аппаратный широтно-импульсный модулятор (ШИМ) [1]. В большинстве случаев данная система не позволяет обеспечить требуемого качества регулирования и существенно повышает износ ИМ. В этой связи актуален поиск способов улучшения качества регулирования и снижения износа ИМ.

Структура регулятора на основе ПДД^2-звена представлена на рис. 1, где 1 – ПДД^2-звено, 2 – широтно-импульсный модулятор, 3 – исполнительный механизм постоянной скорости, Δt – длительность импульсов ШИМ, Zn – импульсы ШИМ, ε – отклонение, μ – регулирующее воздействие ИМ.

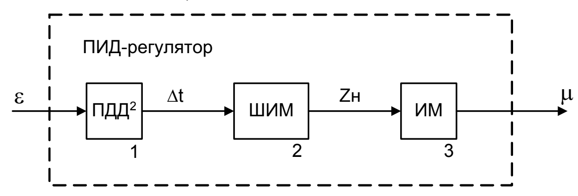


Рис. 1. *Структурная схема цифрового ПИД-регулятора с ИМ постоянной скорости*

Для реализации ПИД-закона регулирования в ПДД^2-звено с передаточной функцией

$$W_{пдд}(p) = K^{пдд} + K^{пдд}\, T_{д}^{пдд}\, p + K^{пдд}\, (T_{дд}^{пдд})^{2}\, p^2, \qquad (1)$$

где $K^{пдд}$ – пропорциональный коэффициент, $T_{д}^{пдд}$ – постоянная времени дифференцирования, $T_{дд}^{пдд}$ – постоянная времени двойного дифференцирования ПДД^2-звена, вводятся параметры:

$$K^{пдд} = \frac{k_p\, T_{им}^{пх}}{T_и},\; T_{д}^{пдд} = T_и,\; (T_{дд}^{пдд})^2 = T_и\, T_д,$$

где k_p – пропорциональный коэффициент ПИД-закона, $T_{им}^{пх}$ – время полного хода исполнительного механизма, с, $T_и$, $T_д$ – постоянная времени интегрирования и дифференцирования, с. Звено ПДД^2 с выходом на ШИМ осуществляется с помощью рекуррентного соотношения [2] для реализации ПИД-закона совместно с ИМ:

$$\Delta t_i = \frac{T_c}{100}\left[K^{пдд}\,\varepsilon_i + K^{пдд}\,T_{д}^{пдд}\,\frac{(\varepsilon_i-\varepsilon_{i-1})}{T_c} + K^{пдд}\,(T_{д}^{пдд})^2\,\frac{(\varepsilon_i - 2\varepsilon_{i-1}+\varepsilon_{i-2})}{T_c^2}\right], \qquad (2)$$

где Δt_i – длительность импульса ШИМ в текущем цикле регулятора, с; T_c – длительность цикла регулятора (равное периоду ШИМ), с; ε_i – отклонение регулируемой величины в текущем цикле регулятора, %. Выражение (2) можно свести к виду:

$$\Delta t_i = \frac{T_{им}^{пх}}{100}\left[k_p\,(\varepsilon_i-\varepsilon_{i-1}) + \frac{k_p\,T_c}{T_и}\,\varepsilon_i + \frac{k_p\,T_д}{T_c}(\varepsilon_i - 2\varepsilon_{i-1}+\varepsilon_{i-2})\right]. \qquad (3)$$

Это выражение описывает ПИД-регулятор в приращениях [3], где первое слагаемое – приращение пропорциональной составляющей, второе – интегральной, третье – дифференциальной. При этом в выражениях (2) и (3) на длительность импульса накладываются следующие ограничения

$$|\Delta t_i| \le T_c, \qquad |\Delta t_i| \ge \Delta t_{имп}^{мин},$$

где $\Delta t_{имп}^{мин}$ – минимальная длительность импульса ШИМ, с, определяемая свойствами ИМ и его устройства управления [4].

Основные недостатки стандартного ПИД-регулятора построенного на основе ПДД^2-звена, ШИМ и ИМ:

1. Ограничение приращения выходной величины (регулирующего воздействия ИМ) ПИД-регулятора длительностью цикла на уровне:

$$\Delta\mu_{макс} = \frac{100\,T_c}{T_{им}^{пх}},$$

где $\Delta\mu_{макс}$ – максимальное приращение регулирующего воздействия ИМ – выхода регулятора, %. Например, в случае, когда длительность цикла T_c=3 с, а время полного хода $T_{им}^{пх}$=50 с, максимальное приращение составляет 6 %.

2. Большая погрешность реализации интегральной составляющей. В стандартном регуляторе приращение интегральной составляющей (3), рассчитываемое за счёт пропорциональной составляю-

щей ПДД[2]-звена (1), вычисляется методом правых прямоугольников [5]:

$$\Delta t_i^{инт} = \frac{T_{им}^{пх}}{100} \Delta I = \frac{T_{им}^{пх}}{100} \frac{k_p T_c}{T_и} \varepsilon_i .$$

Однако методы левых и правых прямоугольников имеют самую высокую погрешность среди численных методов [6].

3. Отключение интегральной составляющей при следующих отклонениях ε и параметрах ПИД-закона регулирования:

$$|\varepsilon| < \frac{100\,\Delta t_{имп}^{мин}\, T_и}{T_{им}^{пх}\, k_p\, T_c}. \qquad (4)$$

При выполнении соотношения (4) приращение интегральной составляющей в законе регулирования не происходит. Причём данная нелинейность сильно зависит от параметров регулятора. На примере ПИ-регулятора с параметрами:

$$k_p=0{,}3;\ T_и=300\ с;\ T_c=5\ с;\ \Delta t_{имп}^{мин}=0{,}1\ с;\ T_{им}^{пх}=50\ с \qquad (5)$$

отключение интегральной составляющей происходит при $|\varepsilon|<40$ %. В свою очередь, чувствительность любого регулятора с выходом на ШИМ и ИМ постоянной скорости определяется выражением

$$\delta = \frac{100\,\Delta t_{имп}^{мин}}{T_{им}^{пх}}, \%.$$

Для параметров (5) чувствительность регулятора может достигать 0,2 %.

4. Проявление дифференцирующих свойств при реализации пропорциональной составляющей в режиме насыщения $|k_p \cdot \varepsilon|<100$ %. Данный эффект отражён на рис. 2, где 1 – отклонение регулируемой величины, 2 – выход аналогового пропорционального регулятора (П-регулятора), 3 – выход импульсного П-регулятора, 4 – импульсы ШИМ. Дифференцирующие свойства вызваны тем, что пропорциональная составляющая ПИД-закона (3) реализуется за счёт дифференциальной составляющей ПДД[2]-звена (1):

$$\Delta t_i^{пр} = \frac{T_c}{100} K^{пдд}\, T_д^{пдд}\, \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1})}{T_c} = \frac{T_{им}^{пх}}{100} k_p\ (\varepsilon_i - \varepsilon_{i-1}).$$

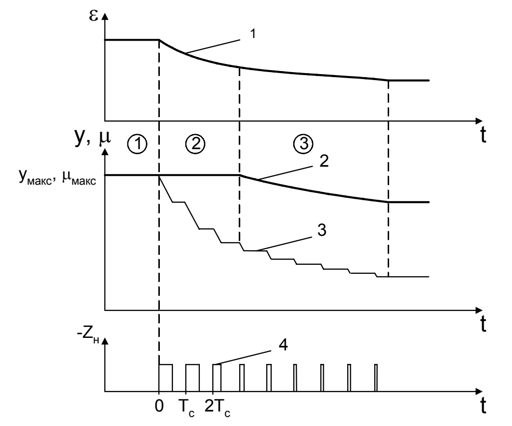


Рис. 2. *Проявление дифференцирующих свойств импульсного П-регулятора на основе ПДД[2]-звена*

Например, если $k_p \cdot \varepsilon>100$ %, и ε уменьшается (рис. 2, интервал 2), то появляется отрицательное приращение пропорциональной составляющей, которое приводит к перемещению регулирующего органа (РО), что недопустимо для ПИ-регулятора.

5. Влияние дифференциальной составляющей закона регулирования на пропорциональную составляющую в режиме ограничения приращения выхода регулятора. Данный эффект возможен при:

$$|\varepsilon| \geq \frac{100}{T_{им}^{пх}} \frac{T_c^2}{k_p\,(T_c + T_д)}, \qquad (6)$$

и представлен на рис. 3, где 1 – отклонение регулируемой величины, 2 – импульсы ШИМ для регулятора с длительностью цикла T_c, 3 – импульсы ШИМ для регулятора с длительностью цикла T_c^*, 4 – воздействие ИМ для регулятора с длительностью цикла T_c^*, 5 – воздействие ИМ для регулятора с длительностью цикла T_c. Причём для регулятора с длительностью цикла T_c^* ограничения приращения регулирующего воздействия не происходит. При положительном импульсном воздействии на регулятор, при выполнении (6), РО сначала откроется на $\Delta\mu_{макс}$, а в следующем цикле закроется на $\Delta\mu_{макс}$, после чего будет происходить приращение выхода за счёт интегральной составляющей (рис. 3, кривая 5). Однако, в данном случае, пропорциональная составляющая закона регулирования отсутствует.

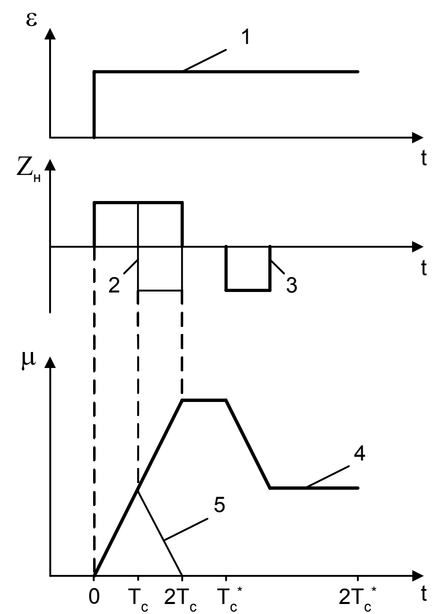


Рис. 3. *Влияние дифференциальной составляющей на пропорциональную составляющую закона регулирования*

По результатам анализа поведения САР с разными регуляторами, разработан алгоритм цифрового регулятора с коррекцией нелинейностей (ЦРК) с выходом на ШИМ, который совместно с ИМ формирует закон, максимально приближенный к ПИД-закону регулирования. В данном алгоритме устранены недостатки стандартных регуляторов на основе ПДД[2]-звена. В ЦРК первый недостаток устранён за счёт введения в регулятор корректора дли-

тельности управляющего импульса, текущего такта регулирования в зависимости от оставшейся после ограничения длительности импульса предыдущего такта регулирования. Второй недостаток устранён за счёт реализации интегральной составляющей методом трапеций. Третий недостаток исключён за счёт введения в регулятор алгоритма коррекции, который рассчитывает период ШИМ

$$T = i \cdot T_c,\ i = 1, 2, 3, ...$$

и длительность импульса

$$\Delta t_i^* = \sum_i \Delta t_i,\ i = 1, 2, 3, ...$$

в режиме $|\Delta t_i| < \Delta t_{имп}^{мин}$. Четвёртый и пятый недостатки устранены за счёт введения дополнительных блокировок (ограничений) на пропорциональную и дифференциальную составляющие.

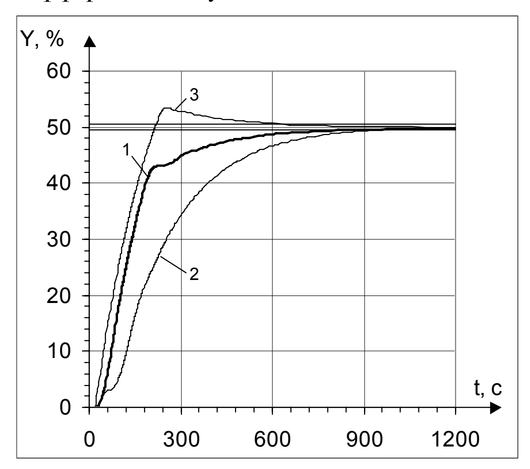


Рис. 4. *Переходные процессы по управлению*

Методом имитационного моделирования произведено сравнительное исследования качества регулирования в САР с ИМ постоянной скорости построенных на основе релейно-импульсного регулятора [4], ПДД²-звена (ПДД²-ШИМ-регулятор) и ЦРК (ЦРК-ШИМ-регулятор), а также линейной САР с пропорциональным ИМ. На рис. 4 представлен пример переходного процесса по управлению для технологического объекта (ТОУ) с передаточной функцией:

$$W_{об}^{u}(p) = \frac{K_o^u}{T_o^u\, p + 1} e^{-\tau_o^u p} = \frac{0,8}{200\, p + 1} e^{-20p},$$

при одинаковых параметрах настройки регуляторов, где кривая 1 – САР с ЦРК-ШИМ-регулятором, 2 – САР с ПДД²-ШИМ-регулятором, 3 – САР с аналоговым ПИД-регулятором, Y – выход ТОУ. Данный пример показывает, что недостатки (а именно, 1 и 5 недостатки) стандартного регулятора ПДД²-ШИМ существенно ухудшают показатели качества переходного процесса по управлению (кривая 2), отдаляют систему от линейной (кривая 3). При этом управляющее воздействие (кривая 2) ПДД²-ШИМ-регулятора (рис. 5) не соответствует ПИД-закону.

На рис. 6 представлен переходный процесс по возмущению для ТОУ с передаточной функцией:

$$W_{об}^{u}(p) = \frac{K_o^u}{T_o^u\, p + 1} e^{-\tau_o^u p} = \frac{1,2}{50\, p + 1},$$

$$W_{об}^{u}(p) = \frac{K_o^f}{T_o^f\, p + 1} e^{-\tau_o^f p} = \frac{1,2}{25\, p + 1},$$

при одинаковых параметрах настройки регуляторов, где кривая 1 – САР с ЦРК, 2 – САР с ПДД²-ШИМ, F – возмущение. В данном случае САР с ПДД²-ШИМ-регулятором (кривая 2) не обеспечивает требуемой точности регулирования, что вызвано вторым недостатком.

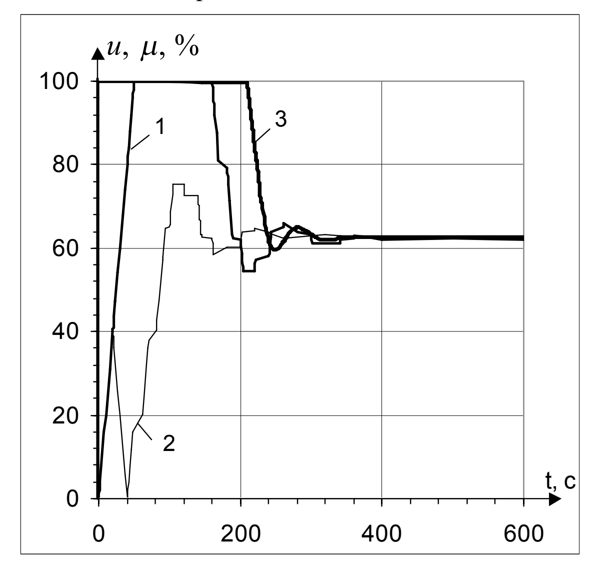


Рис. 5. *Управляющие воздействия регуляторов*

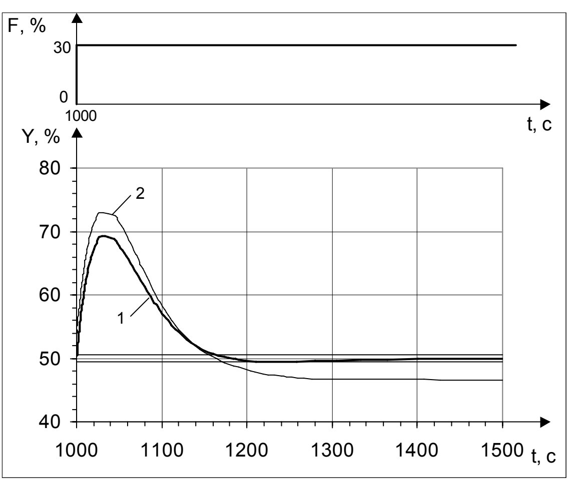


Рис. 6. *Переходные процессы по возмущению*

На рис. 7 показан пример другого переходного процесса по возмущению для ТОУ с передаточной функцией:

$$W_{об}^{u}(p) = \frac{K_o^u}{T_o^u\, p + 1} e^{-\tau_o^u p} = \frac{10}{2\, p + 1} e^{-0,5\, p},$$

при одинаковых параметрах настройки регуляторов, где кривая 1 – САР с ЦРК, 2 – САР с ПДД²-ШИМ. В данных САР цикл регулятора превышает постоянную времени ТОУ и составляет 5 с.

Рис. 7 показывает, что САР с ПДД²-ШИМ-регулятором (кривая 2) обеспечивает существенно худший переходный процесс по сравнению с системой на основе ЦРК (кривая 1), что вызвано вторым недостатком (высокой погрешностью реализации интегральной составляющей в ПДД²-ШИМ).

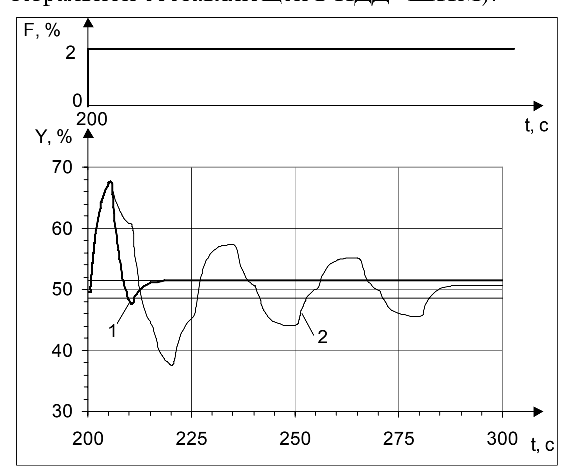


Рис. 7. *Переходные процессы по возмущению*

Уменьшение цикла регулирования с целью уменьшения погрешности реализации интегральной составляющей приводит к увеличению статической ошибки регулирования, как это показано на рис. 8 (кривая 2).

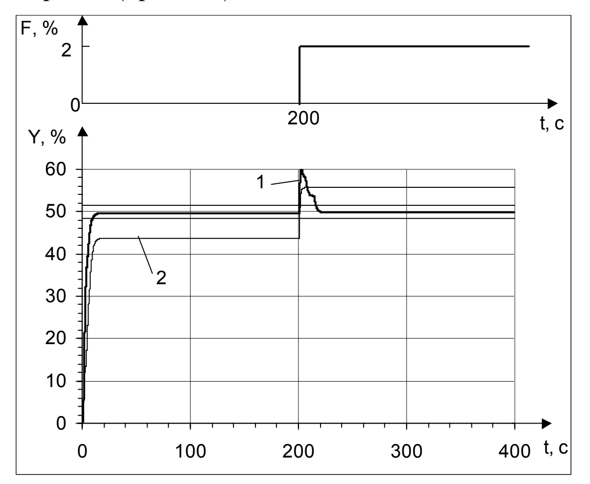


Рис. 8. *Переходные процессы по управлению и возмущению*

В свою очередь, компенсация статической ошибки за счёт увеличения коэффициента передачи и уменьшения постоянной времени интегрирования приводит к неустойчивой САР, как представлено на рис. 9 (кривая 2). При этом уменьшение цикла регулирования в САР с ЦРК приводит, наоборот, к улучшению показателей качества (рис. 8, 9, кривая 1).

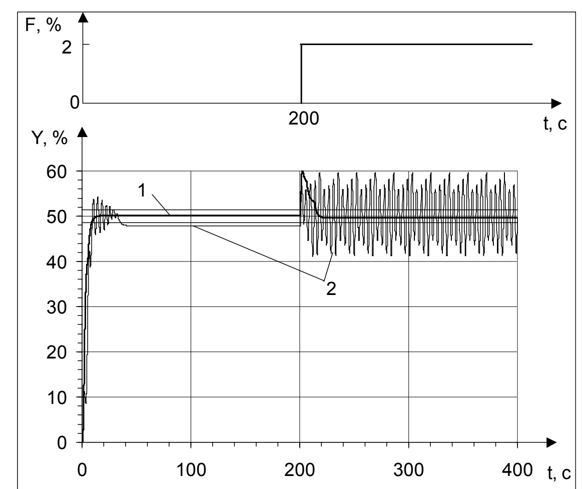


Рис. 9. *Переходные процессы по управлению и возмущению*

Из результатов моделирования следует, что недостатки стандартного ПДД²-ШИМ-регулятора существенно ухудшают показатели качества регулирования. Экспериментально подтверждено, что ПДД²-ШИМ удовлетворительно аппроксимирует ПИД-закон в очень узкой области параметров, обеспечивая приемлемое качество регулирования, в остальных же случаях качество регулирования неудовлетворительное. В большинстве случаев попытки улучшить качество перебором параметров не дают положительного результата. В свою очередь, в разработанном ЦРК эти недостатки устранены, качество регулирования и переходные процессы максимально приближены к САР с аналоговым ПИД-регулятором.

Таким образом, в системах, имеющих сложные объекты управления с повышенными требованиями к качеству регулирования, применение регулятора на основе ПДД²-звена, ШИМ и ИМ недопустимо. Новая реализация цифрового регулятора с ШИМ, обеспечивающего аппроксимацию ПИД-закона с высокой точностью в широком диапазоне изменения параметров, позволяет существенно улучшить качество регулирования в САР с ИМ постоянной скорости, уменьшить износ ИМ и существенно расширить область применения данных ИМ в микропроцессорных автоматизированных системах управления технологическими процессами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андык В.С., Рязанов В.И. Применение микропроцессорных контроллеров в управлении теплоэнергетическими процессами. Учебное пособие. – Томск: ТПИ, 1988. – 60 с.
2. Олссон Г., Пиани Дж. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб.: Невский Диалект, 2001. – 470 с.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
4. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования. Справочное пособие / Под ред. А.С. Клюева, А.Т. Лебедева, С.А. Клюева, А.Г. Товарнова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Мир, 1970. – 720 с.
6. Мудров А.Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: МП "РАСКО", 1991. – 270 с.